وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه دامغان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

فیزیک (گرایش نجوم و اختر فیزیک)

مروری بر نظریه‌ی

اسکالر- تانسور- بردارگرانشی(STVG)

توسط:

شیوا سلیمانی

استاد راهنما:

دکتر مسعود جعفری

استادمشاور:

دکتر محمود روشن

شهریور ۱۳۹۳

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

مروری بر نظریه‌ی

اسکالر- تانسور- بردارگرانشی(STVG)

توسط:

شیواسلیمانی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته

فیزیک (گرایش نجوم و اختر فیزیک)

از دانشگاه دامغان

ارزیابی و تایید شده توسط کمیته پایان نامه با درجه:

دکتر مسعود جعفری، استادیار رشته فیزیک گرایش نجوم، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان(استاد راهنما)

دکتر شهاب شهیدی، استادیار رشته فیزیک گرایش گرانش، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان(داور اول)

دکتر زهرا حقانی، استادیار رشته فیزیک گرایش گرانش، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان(داور دوم)

شهریور۹۳

تقدیم به

تمامی اعضای خانواده ام

بویژه پدر ومادر مهربانم

تشکر و سپاس:

سپاس خداوندی را که نشانه‌های وجودش در تمامی عالم خلقت گسترده شده است.
دراین جا لازم است از تمامی کسانی که مرا در انجام و به پایان رساندن این پایان نامه همراهی و کمک نمودند تشکر و قدردانی نمایم، از اساتید گرانقدری چون جناب آقایان دکتر مسعود جعفری، محمود روشن، بهرام مشحون، سهراب راهوار که اخلاق علمی شان، انگیزه وشوق تحقیق و پژوهش را در من زنده نگاه می‌داشت بی نهایت ممنون و سپاسگزارم.

چکیده

مروری بر نظریه‌ی

اسکالر- تانسور- بردار گرانشی(STVG)

بوسیله ی:

شیوا سلیمانی

منجمین به این نتیجه رسیده‌اند که دینامیک کیهان را بدون ماده‌ی اضافی نمی‌توان توضیح داد. برای حل این معضل دو راه پیشنهاد شده است، یکی این که در ساختارهای مختلف مانند کهکشان‌ها، خوشه‌های کهکشانی و کل کیهان، مقداری ماده وجود دارد که آن را نمی‌بینیم و به ماده تاریک معروف است و یا شاید اینکه دینامیک نیوتنی و نسبیتی در فواصل زیاد معتبر نباشد و به عبارت دیگر قانون دوم نیوتن یا گرانش تغییر کند. در دو دهه‌ی گذشته شواهد زیادی در حمایت از ماده تاریک ارائه شده است. یکی از قانع کننده ترین شواهد برای ماده تاریک، از مشاهدات تابش ریزموج زمینه‌ی کیهانی برمی‌آید. پس از گذشت چندین دهه تحقیق، هنوز ذرات تشکیل دهنده ماده تاریک بطور مستقیم مشاهده نشده است. در این پایان نامه قصد داریم مروری بر نظریه اسکالر-تانسور-بردار گرانشی داشته باشیم که در آن G ثابت گرانش نیوتنی، ω ثابت جفت شدگی با میدان برداری و μ جرم میدان برداری ، میدان‌های اسکالر دینامیکی هستند که نسبت به فضا و زمان متغیرند، همچنین علاوه بر میدان تانسوری متریک $g_{\mu\nu}$ ، یک میدان برداری ϕ_{μ} نیز وجود دارد. معادله حرکت برای ذره آزمون باعث تعمیم شتاب گرانش نیوتنی می‌شود. یک ویژگی مهم این تئوری این است که قانون شتاب تعمیم یافته برای میدان‌های ضعیف گرانشی، یک نیروی دافعه یوکاوا علاوه بر نیروی جاذبه نیوتنی دارد. حد تقریب میدان ضعیف این تئوری می‌تواند مسئله جرم خوشه‌های کهکشانی و منحنی چرخشی کهکشان‌ها را بدون ماده تاریک توضیح دهد.

فهرست مطالب

فهرست مطالب خ

فهرست شکل‌ها ذ

فهرست جدول‌ها ر

۱ ماده تاریک ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ چگالی سطحی دیسک کهکشان راه شیری ۳

۱-۳ پایداری دیسک کهکشانی ۶

۱-۴ پیشرفت تلسکوپ ها ۶

۱-۵ همگرایی گرانشی ۷

۱-۶ ماده تاریک در مقیاس کیهان ۷

۱-۷ موند جایگزینی برای ماده تاریک ۱۰

۲ نظریه‌ی اسکالر تانسور بردار گرانشی(STVG) ۱۳

۲-۱ کنش تئوری STVC ۱۴

۲-۲ معادلات میدان ۱۶

۲-۳ تانسور انرژی- تکانه ۲۵

۲-۴ مسیر حرکت ذره آزمون ۲۶
۲-۵ معادلات حرکت ۲۹
۲-۶ استخراج معادلات حرکت با استفاده از روش چند قطبی . . ۳۵
۳ آزمون‌های رصدی تقریب میدان ضعیف نظریه‌ی MOG ۴۳
۳-۱ تقریب میدان ضعیف در MOG ۴۳
۳-۲ منحنی چرخشی کهکشان‌های مارپیچی ۴۹
۳-۳ معادله بولتزمن درMOG ۶۵
۳-۴ اطلاعات خوشه های کهکشانی از تلسکوپ پرتوایکس چاندرا . . ۶۹
۳-۵ جرم دینامیکی خوشه های کهکشانی ۷۴
۴ جمع بندی ۷۹
مراجع ۸۱
پیوست الف ۸۴
پیوست ب ۸۷

فهرست شکل‌ها

۱-۱ منحنی سرعت چرخشی بر حسب فاصله از مرکز کهکشان، A آنچه از قانون نیوتنی بدست می‌آید و B آنچه مشاهده می‌شود. ۳

۱-۲ استوانه گوسی برای تعیین چگالی سطحی دیسک کهکشانی. ۴

۱-۳ برازش منحنی سرعت چرخشی تعدادی از کهکشان‌های THINGS با مدل MOG و منحنی توابع درست‌نمایی برای پارامترهای این مدل. ۵۴

۲-۳ منحنی‌های سرعت چرخشی تعدادی از کهکشان‌های THINGS با استفاده از مقادیر ثابت α و μ که $\gamma^{3.6}$ در آنها پارامتر آزاد است. ۵۵

۳-۳ منحنی‌های سرعت چرخشی کهکشان‌های Ursa-Major با استفاده از مقادیر ثابت α و μ که γ_*در آنها پارامتر آزاد است. ۵۶

۴-۳ منحنی نسبت جرم به نور ستاره‌ها بر حسب شاخص رنگ کهکشان ۶۳

۵-۳ منحنی قدر مطلق کهکشان‌های مجموعه Ursa-Major برحسب لگاریتم V_{flat} کهکشان‌ها . ۶۴

۶-۳ منحنی جرم دینامیکی مدل MOG و جرم باریونی خوشه برحسب فاصله از مرکز خوشه. . ۷۶

۷-۳ سمت چپ: منحنی جرم دینامیکی مدل مدل MOG برحسب جرم باریونی برای هر خوشه. سمت راست : نمودار تابع درست نمایی پارامتر برازش $\beta = \frac{M_{bar}}{M_{dim}}$ ۷۸

فهرست جدول‌ها

۳-۱ داده‌های رصدی و پارامترهای مدل MOG یعنی α و μ و γ برای مجموعه THINGS . . ۵۳

۳-۲ کهکشان‌های LSB و HSB از مجموعه کهکشان‌های Ursa Major ۶۰

۳-۳ نتایج بدست آمده از برازش برخی کهکشان‌های مجموعهTHINGS با منحنی‌های چرخشی مدل MOG که در آنها α وμ مقادیر ثابت جهانی‌اند. ۶۲

۳-۴ پارامترهای پروفایل چگالی برای ۱۱ کهکشان رصد شده توسط تلسکوپ چاندرا. . . ۷۲

۳-۵ پارامترهای پروفایل دما برای ۱۱ کهکشان رصد شده توسط تلسکوپ چاندرا. . . ۷۴

۳-۶ مقادیر جرم گاز، جرم ستاره‌ها، جرم باریونی و جرم دینامیکی مدلMOG . . . ۷۵

فصل ۱
ماده تاریک

۱-۱) مقدمه

در این فصل تاریخچه‌ای از پیدایش فرضیه ماده تاریک و کاندیداهای مورد نظر برای ماده تاریک را بطور مختصر بیان می‌کنیم.

اختلاف بین مشاهدات نجومی و دینامیک نیوتنی عامل اصلی برای فرضیه‌ی ماده تاریک است. درسال ۱۹۳۳، منجمی سوییسی به نام زویکی[۱]، با بررسی هشت کهکشان در خوشه‌ی کهکشانی گیسو[۲]، متوجه شد که آنها خیلی سریعتر از آنچه که توسط جرم قابل مشاهده در خوشه ایجاد می‌شود حرکت می‌کنند. وی با استفاده از قضیه‌ی ویریال جرم خوشه را بصورت $M = \frac{RV^2}{G} \cong ۳ \times ۱۰^{۱۴} M_\odot$ بدست آورد، R شعاع مشخصه، V سرعت پخشی یا واریانس سرعت کهکشان‌ها در سیستم (که بوسیله پهنای باند طیفی ستاره‌ها اندازه گیری می‌شود) و G ثابت گرانش نیوتنی است. در حالی که فقط $۱۰^{۱۲} M_\odot$ از جرم خوشه مرئی بود. با داشتن درخشندگی کل این خوشه در طیف مرئی در آن زمان، نسبت جرم به تابندگی[۳] در واحد خورشیدی برای خوشه گیسو محاسبه شد که این مقدار ۵۰۰ برابر بزرگتر از کهکشان‌های تنهاست که در آن زمان مشخص شده بود. بنابراین وی به این نتیجه رسید که مقدار زیادی ماده غیر درخشنده در خوشه وجود دارد تا خوشه گیسو حالت تعادل خود را حفظ کند[۱].

یک سال قبل از کار زویکی ستاره شناس هلندی جان اورت[۴]، از عبارت ماده تاریک برای توضیح چگالی اضافی دیسک کهکشان راه شیری استفاده کرده بود، البته وی این ماده تاریک را که در دیسک کهکشان توزیع شده بود به گرد و غبار و گاز غیرمریی میان ستاره‌ها نسبت داد. دلیل دیگری بر فرضیه حضور ماده تاریک در کهکشان‌ها منحنی سرعت چرخشی آن‌ها است.

---

[۱] Zwicky

[۲] Coma

[۳] Mass-to-light ratio

[۴] Jan Oort

ســـتاره‌ها در یک کهکشـــان مارپیچی عمدتاً در یک قرص قرار گرفته‌اند و برخی دیگر در چند بازوی مارپیچی شـکل قرار دارند. سـتاره ها به دور مرکز کهکشـان در حال چرخش هستند، بعضی از ستارگان به ما نزدیک می‌شوند و برخی دیگر از ما دور می‌شوند.

در سال۱۹۳۹ منحنی سرعت چرخشی با استفاده از داده‌های طیف سنجی در منطقه تابش مرئی (تا فاصله ۲۰ kpc از مرکز کهکشان) بر حسب فاصله از مرکز کهکشان برای کهکشان $M۳۱$ (آندرومدا ، نزدیکترین کهکشان مارپیچی به ما) توسط شخصی به نام بابکوک[۵] رسم شد و متوجه شد ناحیه خارجی این کهکشان با سرعت غیر قابل انتظاری در چرخش است و منحنی چرخشی عموماً در شعاع های بزرگ تخت است. در مکانیک نیوتنی سرعت ستاره‌ها در فواصل دور از مرکز کهکشان بصورت $V = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ کاهش می‌یابد که این با تخت شدن منحنی چرخشی در فواصل دور از مرکز در تضاد است. سرعت زیاد ستاره‌ها در فواصل دور از مرکز منجر به نسبت بزرگتری از $\frac{m}{L}$ (نسبت جرم به تابندگی) خواهد شد، اما بابکوک نتیجه گرفت که جذب نور توسط گرد و غبار در ناحیه بیرونی کهکشان نقش مهمی در این نسبت دارد. این گونه نتیجه گیری باعث شد که به مدت ۱۵ سال این ناهمخوانی‌ها کم اهمیت تلقی شوند البته پیشنهاد دیگر بابکوک اصلاح قانون نیوتن بود که جدی گرفته نشد.

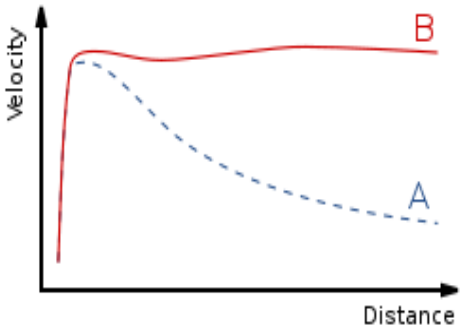
در سال ۱۹۴۰، اورت پی برد که یک خط طیفی در ناحیه‌ی رادیویی طیف الکترومغناطیسی وجود دارد که در بررسـی سـاختار کهکشـانی بسیار مفید است. هیدروژن عنصر غالب درجهان است و ساده ترین ساختار را دارد. هنگامی که اسـپین الکترون و اسـپین پروتون با هم موازی هسـتند انرژی سـیستم اندکی بیشتر از حالتی اسـت که اسپین آنها در خلاف جهت یکدیگرند، و این تغییر جهت در اسپین باعث می شود که هیدروژن خنثی فوتونی با طول موج ۲۱cm منتشـر کند. مشـاهدات نشـان می‌دهد که در مرکز کهکشـان ستاره های پیر وجود دارد، در دیسک، ستاره‌های جوان و هر چه به لبه‌ها نزدیکتر می‌شویم ستاره‌ها جوانتر می شوند. در ادامه بازوها و در خارج از آنها گازهیدروژن درمنطقه‌ی وسـیعی وجود دارد، بطوری که گاز هیدروژن حدوداً ۱/۵ برابر شـعاع دیسک نوری توسعه می‌یابد؛ این ابرهای مولکولی آنچنان چگال نیستند که در آنها ستاره‌زایی رخ دهد. با استفاده از نمودارهای خط طیفی ۲۱cm هیدروژن، منحنی چرخشـی کهکشـان‌ها با دقت بیشتری تعیین شد و سرعت چرخشـی برای فواصـل دور از مرکز کهکشـان در حدود ۲۰۰ تا $\left(\frac{Km}{s}\right)$ ۲۵۰، که تقریباً در یک منطقه وسیعی ثابت است، بدست آمد.

در سال۱۹۵۴ مارک شوارزشیلد[۶] مشاهدات خود را بر روی کهکشان‌های تنها متمرکز کرد پس از بررسی های زیاد بر روی آندرومدا ، M۳۲ و NGC۳۱۱۵ به این قطعیت رسـید که مقدار $\frac{m}{L}$ بیشـتر از آنچه انتظار می رود بدست می‌آید. وی نتایج بدست آمده را با یک مدل توزیع جرم خاص در کهکشان‌های مارپیچی توضیح داد و در کهکشـان‌های بیضوی مجبور شد فرض کند تعداد بسیار زیادی ستاره مرده (کوتوله‌های سفید سرد) نیز در

[۵] Bobcock

[۶] Mark Schwarzchild

توزیع جرم نقش دارند. این پیشنهاد همخوانی نسبتاً خوبی در ناحیه اپتیکی داشت اما برای توضیح خوشه گیسو جرم پیشنهادی وی ۴ برابر بیشتر از جرم روشن بود و در نتیجه با مشاهدات همخوانی نداشت.



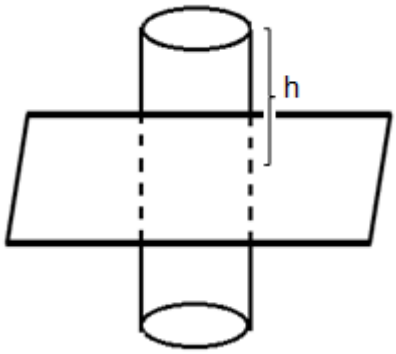
شکل۱-۱: منحنی سرعت چرخشی برحسب فاصله از مرکز کهکشان؛ A آنچه از قانون نیوتنی بدست می‌آید وB آنچه مشاهده می‌شود [۲].

۱-۲)چگالی سطحی دیسک کهکشان راه شیری

در۱۹۶۰، اورت با بررسی و مطالعه مولفه سرعت عمود بر صفحه کهکشان راه شیری مربوط به ستاره‌های تابان بزرگ و ارتباط آن با نیروی گرانشی عمود به صفحه، چگالی جرمی متوسط در صفحه را $۱۰^{-۲۳}\left(\frac{gr}{cm^۳}\right)$ تخمین زد، که این عدد معادل ۶ اتم هیدروژن بر سانتی مترمکعب است. در حالی که برای ستاره‌های شناخته شده این چگالی معادل $۲\left(\frac{atom}{cm^۳}\right)$ است. پس فقط $\frac{۱}{۳}$ جرم دینامیکی در دیسک کهکشان قابل مشاهده است و مابقی از ماده ناشناخته‌ای است.

در اینجا با محاسبه چگالی سطحی دیسک کهکشان راه شیری با توجه به حرکت نوسانی ستاره‌ها در دیسک و همچنین حرکت دورانی ستاره‌ها نشان می‌دهیم که در مکانیک نیوتنی تنها ماده روشن نمی‌تواند ساختار کهکشان را تشکیل دهد.

همانطور که اشاره شد ستاره‌هایی که در فواصل دورتری از مرکز کهکشان قرار دارند با سرعت $۲۰۰\left(\frac{Km}{s}\right)$ به دور مرکز کهکشان می‌چرخند و علاوه بر این یک حرکت کاتوره‌ای نیز دارند، از روی این حرکت می‌خواهیم جرم کل دیسک را حساب کنیم. دیسک را صفحه‌ای با ضخامت h درنظر می‌گیریم و تمام جرم دیسک را در صفحه قرارمی‌دهیم طوری که چگالی سطحی آن Σ باشد یعنی $\Sigma = \frac{dM}{ds}$. اگرصفحه بزرگ باشد و بر روی آن تقارن داشته باشیم کافی است فقط مولفه عمودی شتاب را درنظر بگیریم. بااستفاده از قضیه‌ی گوس برای استوانه‌ای به ارتفاع h داریم:



شکل ۱-۲: استوانه گوسی برای تعیین چگالی سطحی دیسک کهکشانی.

$$\oint g.ds = ۴\pi GM \qquad \Longrightarrow \qquad g = \frac{۲\pi GM}{s} = ۲\pi G\Sigma$$

g شتاب گرانش ناشی از دیسک باریک است و باعث نوسان ستاره‌ها در بالا و پایین دیسک می‌شود.
از طرفی می‌توان نوشت:

$$g = \frac{d\Phi}{dz} = ۲\pi G\Sigma$$

پس برای متوسط پتانسیل داریم:

$$< \phi >= ۲\pi G\bar{\Sigma}h$$

که $\bar{\Sigma}$ متوسط چگالی دیسک است. پتانسیل ازمرتبه سرعت به توان ۲ است(با استفاده از قضیه ویریال)، پس بطور تقریبی می‌توان نوشت :

$$V^۲ \cong ۲\pi G\bar{\Sigma}h$$

بدین ترتیب با استفاده ازحرکت نوسانی ستاره‌ها درراستای قائم، از رابطه ی فوق برای متوسط چگالی سطحی دیسک داریم $\bar{\Sigma} = ۵۰\left(\frac{M_\odot}{Pc^۲}\right)$.

اگر چگالی جرمی دیسک را از رابطه $\rho = \frac{\bar{\Sigma}}{h}$ بدست آوریم و با استفاده از داده‌های فتومتری چگالی درخشندگی دیسک را محاسبه کنیم، نسبت جرم به نور دیسک کهکشانی ۳/۳ برابر نسبت جرم به نور خورشید است و این نشان می‌دهد که باید مقداری ماده تاریک دردیسک کهکشان داشته باشیم. درحالی که این مقدار برای ماده باریونی (مجموع جرم گاز، ستاره‌ها وستاره‌های پیرمشتمل برکوتوله‌های سفید، سیاه‌چاله‌ها و ستاره های نوترونی) ۱/۷ برابر خورشید است.

از طرفی با بررسی حرکت دورانی ستاره‌ها حول مرکز جرم کهکشان می توان چگالی سطحی دیسک را حساب کرد. در دیسکی به شعاع R داریم:

$$M(R) = \pi \Sigma R^{2}$$

و

$$\frac{GM(R)}{R} = \mathrm{V}^{2}$$

از دو رابطه فوق داریم:

$$\mathrm{V}^{2} = G\pi R\Sigma$$

با قرار دادن $\mathrm{V} = 220(\frac{\mathrm{Km}}{\mathrm{s}})$ و $\mathrm{R} = 8\mathrm{kpc}$ برای چگالی سطحی بدست می‌آوریم $\Sigma = 150\left(\frac{M_{\odot}}{PC^{2}}\right)$.

از مقایسه این دو عدد برای چگالی سطحی می‌توان نتیجه گرفت که ($\bar{\Sigma} = 50(\frac{M_{\odot}}{Pc^{2}})$ نمی‌تواند جرم لازم برای حرکت دورانی ستاره‌ها را فراهم کند و کهکشان برای برقراری حرکت دورانی ستاره‌ها، علاوه بر دیسک باید ساختار دیگری نیز داشته باشد که آنرا هاله‌ی کهکشان می‌نامیم.

توزیع ماده در این هاله‌ی تاریک باید به گونه‌ای باشد که سرعت چرخشی ثابتی را در نقاط دور از مرکز تولید کند. شتاب گرانش در هر نقطه از کهکشان با توجه به قانون نیوتن بصورت زیر است:

$$a(r) = \frac{GM(r)}{r^{2}} = \frac{V^{2}(r)}{r}$$

با توجه به اینکه در فواصل دور از مرکز کهکشان، سرعت ثابت است از رابطه فوق نتیجه می‌گیریم که باید $\mathrm{M(r)} \propto \mathrm{r}$ باشد، یعنی مقدار جرمی که در فاصله‌ی معینی از مرکز کهکشان قراردارد باید متناسب با فاصله باشد ، مثلاً در فاصله‌ای سه برابر از خورشید جرم موجود سه برابر بزرگتر است. اگر از طرفین این تناسب مشتق بگیریم باید:

$$\frac{dM}{dr} = \mathrm{C} \qquad \Longrightarrow \qquad \frac{\rho(r)4\pi r^{2}}{dr} = \mathrm{C} \qquad \Longrightarrow \qquad \rho(r) = \frac{C^{'}}{r^{2}}$$

C و $C^{'}$ هر دو ثابت هستند. پس چگالی در کهکشان باید بصورت $\frac{1}{r^{2}}$ تغییر کند.

اما جرم این هاله چقدر است و تا کجا گسترده شده است؟ دینامیک ابرهای ماژلانی (قمرهای کهکشان راه شیری)، که در فاصله ۴۰ تا $50kpc$ هستند، نشان می‌دهد که حرکت آنها در توافق با توزیع هاله کروی است پس باید این توزیع تا ابرهای ماژلانی گسترده شده باشد و این هاله ساختار بزرگی داشته باشد.

برای محاسبه‌ی جرم هاله می‌توان نوشت:

$$M(r) = \int 4\pi\rho(r)r^{2}dr = 4\pi C^{'}r$$

با استفاده از قانون دوم نیوتن، مقدار ثابت $C^{'}$ را می‌توان بدست آورد:

$$\frac{G4\pi C^{'}r}{r^{2}} = \frac{V^{2}(r)}{r} \qquad \Longrightarrow \qquad C^{'} = \frac{V^{2}}{4\pi G}$$

بنـابراین جرم هاله برابر $M_{\text{halo}} = \frac{\mathrm{R}V^{۲}}{\mathrm{G}}$ می‌باشـــد. اگر R را برابر $۶۰kpc$ و V را برابر $۲۲۰\left(\frac{km}{s}\right)$ قرار دهیم جرم هاله مسـاوی $۶ \times ۱۰^{۱۱} M_{\odot}$ اسـت. این مقدار جرم هاله ۱۰ برابر جرم مرئی کهکشـان راه شـیری است.

۱-۳)پایداری دیسک کهکشانی

با ورود کامپیوتر در دهه۱۹۶۰ تلاش‌های زیادی صورت گرفت تا بر پایه ی مکانیک نیوتنی شبیه سازی‌های تحول کهکشانی صورت پذیرد. در یک آزمایشگاه مجازی یک سیستم N ذره‌ای دوبعدی مشابه دیسک کهکشانی شبیه سازی شد. در این شبیه‌سازی ذرات توسط نیروی گرانشی که خودشان تولید کرده‌اند حول مرکز جرمشان می‌چرخند، علاوه براین حرکت نیز یک حرکت کاتوره‌ای در جهت‌های مختلف دارند و نیروی گریز از مرکز از رمبش آنها جلوگیری می کند، ولی پس از مدتی ساختار آنها تغییر کرده ومدار هر ذره شبیه یک بیضی کشیده می‌شود و سیستم به یک ساختار میله شکل مبدل می‌شود؛ این تحول سریع به ناپایداری دیسک کهکشانی معروف است. در دهه۱۹۸۰ دو نفر به نام های استرایکر[۷] وپیبلز[۸] نشان دادند اگر نیروی گرانشی ناشی از یک هاله‌ی کروی تاریک را که مانند ذرات معمولی نیستند به سیستم ذرات اضافه کنیم، آنگاه دیسک پایدار خواهد بود. این پیشنهاد یکی از مهم ترین قدم‌ها در نشان دادن اهمیت حضور ماده تاریک در تکامل ساختار کهکشانی بود[۱].

۱-۴)پیشرفت تلسکوپ‌ها

در اواخر ۱۹۷۵ پیشرفت‌های مهم در تلسکوپ‌های رادیویی و نوری، شکی را در تخت بودن منحنی سرعت چرخشی کهکشان‌های مارپیچی برجای نگذاشت. از مشاهدات منحنی چرخشی در طول موج مرئی مشخص شد که در کهکشان‌های مارپیچی، محیط پیرامون ستاره‌های جوان را گاز یونیزه‌ای پر کرده است. در واقع این ستاره‌ها با تابش امواج فرا بنفش گاز پیرامون خود را یونیزه می‌کنند و این گاز یونیزه امواجی در ناحیه‌ی طول موج مرئی که ناشی از باز ترکیب هیدروژن است ساطع می‌کنند.

آشکار سازی پرتو ایکس، که از خوشه‌های کهکشانی ساطع می شود، نشان داد که آنها حاوی گاز بسیار داغی هستند و بیشتر جرم باریونی مربوط به همین گاز است بطوری که جرم این گاز از جرم کل ستاره ها در کهکشان‌ها بیشتر است. ولی هنوز بین نتایج رصدی و نتایج نظریه ی نیوتنی اختلاف وجود دارد.

با کشف این گاز نسبت جرم کل به جرم باریونی حدود ۶ بدست آمد، یعنی خوشه‌ها ۶ برابر سنگین‌تر از آن چیزی هستند که دیده می‌شوند.

---

[۷] Ostriker

[۸] Peebles

محاسبات نشان می‌دهد که در ساختارهای کوچکتر مثل منظومه شمسی سهم ماده تاریک تقریباً صفر است، در دیسک کهکشانی نسبت جرم به نور تقریباً ۳ است، در خود کهکشان این نسبت بیشتر و در خوشه‌ی کهکشانی تقریباً ۲۶۰ می‌باشد؛ هر چه مقیاس بزرگتر شود نسبت جرم به نور نیز بیشتر می‌شود تا از مقیاسی به بعد (حدوداً ۱۰۰Mpc که کیهان همگن است) این نسبت تغییری نمی‌کند و ثابت است، این افزایش نسبت جرم به نور بیانگر حضور ماده تاریک بیشتری است.

در کیهان شناسی کمیتی به نام Ω بصورت نسبت چگالی به چگالی بحرانی کیهان تعریف می‌شود ، مقادیر این کمیت برای کل ماده (باریونی وغیرباریونی) $\Omega_{matter} = ۰/۲۵$ است که ۰/۰۴ آن مربوط به ماده باریونی است وفقط ۰/۰۱ از آن مرئی و مابقی آن ماده تاریک باریونی است[۳].

۱-۵) همگرایی گرانشی

مشاهدات همگرایی گرانشی خوشه های کهکشانی امکان تخمین مستقیم جرم بر پایه تاثیر آن بر نور کهکشان‌های پس زمینه را فراهم می کند. توده‌های عظیم ماده (تاریک یا معمولی) از طریق گرانش موجب خمش نور می‌شوند. مشاهدات همگرایی تایید می‌کنند که میزان ماده موجود به میزان قابل توجهی بیشتر از آن مقداری است که از نور این کهکشان‌ها استنباط می شود.

در خوشه گلوله، مشاهدات همگرایی بیانگر آن است که بیشتر جرمی که موجب همگرایی می‌شود از جرم باریونی منتشر کننده پرتو ایکس مجزا است یعنی بیشتر توزیع جرم این خوشه گلوله در خارج از ماده باریونی (گاز داغ وکهکشان‌ها) قرار گرفته است[۲].

۱-۶) ماده تاریک در مقیاس کیهان

جهان، از تابش (فوتون‌ها) و گازی یونیزه و الکترون‌ها و نوترینوها و.... تشکیل شده بود که در یک دوره خاص که به دوره بازترکیب[۹] یا واجفتیدگی معروف است این گاز خنثی می‌شود یعنی الکترون‌ها که تا این زمان با فوتون‌ها تحت پراکندگی کامپتون در تعادل حرارتی بودند از این تعادل واجفتیده می‌شوند و فوتون‌ها می‌توانند در جهان حرکت کنند بدون اینکه از طریق الکترون‌ها پراکنده شوند و در نتیجه جهان شفاف می‌شود از آن زمان تاکنون این فوتون‌ها سردتر می‌شوند، این شفاف شدن در انتقال به سرخ $z = ۱۱۰۰$ اتفاق می‌افتد. این فوتون‌ها تابش میکرو موج کیهانی[۱۰] را تشکیل می‌دهند. افت و خیز چگالی در ماده از این زمان می‌تواند رشد کند بدین شکل که ماده به سمت جایی با چگالی بالاتر از چگالی متوسط جذب می‌شود.

[۹] Recombination

[۱۰] CMB(Cosmic Microwave Background)

افت و خیز چگالی اولیه در ماده می‌بایست از مرتبه افت و خیز دمایی فوتون‌ها در آن دوره باشد. به منظور تلاش در کاوش برای افت و خیزهای دمایی در فوتون‌های تابش میکروموج کیهانی، ناسا با ارسال ماهواره COBE به این نتیجه رسید که تابش میکروموج کیهانی دارای طیف جسم سیاه بوده و دمای آن $T = ۲/۷۸K$ است. COBE نشان داد که تابش میکروموج کیهانی با تقریب خوبی همسانگرد است، اما افت و خیزهای بسیار کوچک دمایی در آن وجود دارد. از بررسی افت و خیز دما، که ناشی از افت وخیز چگالی است، در تابش زمینه میکرو موج کیهانی و همچنین تئوری تشکیل ساختار کیهان، که ناشی از ناپایداری گرانشی در کیهان اولیه‌ی همگن است، حضور یک ماده تاریک غیر باریونی ضروری است. رابطه‌ی بین افت و خیز چگالی و انتقال به سرخ بصورت $\frac{\delta\rho}{\bar{\rho}} = \frac{۱}{۱+z}$ می‌باشد[۱]، که در هنگام تشکیل ساختار کیهان $(z = ۱۱۰۰)$ باید $\frac{\delta\rho}{\bar{\rho}} \sim ۱۰^{-۳}$ باشد ولی نتایج رصدی مقدار $۱۰^{-۵}$ را گزارش کرده‌اند. این اختلاف ناشی از ماده تاریکی است که فاقد برهم کنش با ماده معمولی و فوتون‌هاست و فقط ازطریق آثار گرانشی خود مشخص می‌شود. پس باید فرض باریونی بودن ماده تاریک را کنار گذاشت. به عبارت دیگر اگر ماده تاریک وجود نمی‌داشت، برای تشکیل ساختار باید افت وخیز در چگالی حدود ده برابر بزرگتر از مقداری بود که از تابش میکروموج کیهانی اندازه گیری می‌شود.

در مدل استاندارد برای ذرات بنیادی هنوز چنین ماده‌ای وجود ندارد. در حدود ۲۰ سال قبل جرم نوترینوها حدود ۲۰ تا ۳۰ الکترون ولت تخمین زده شد، $(۱ev = ۱/۸ \times ۱۰^{-۳۳} gram)$[۱۱]؛ این مقدار جرم کافی است تا $\Omega_\upsilon = ۱$ باشد ونوترینو را به عنوان اولین کاندید ماده تاریک داغ[۱۲] غیر باریونی پذیرفتند. نوترینوها زمانی از فوتون‌ها در حمام گرمایی(جهان اولیه) جدا می‌شوند که انرژی متوسط ذرات و فوتون‌ها حدود $۲Mev$ باشد. ذراتی با جرم سکون حدود چند الکترون ولت با این انرژی جنبشی ۲ مگاالکترون ولتی نسبیتی هستند و با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت می کنند و آزادانه در افق جریان دارند[۱۳]. این چنین ماده تاریک نسبیتی، ماده تاریک داغ است. جرم کل نوترینوهایی که درون افق هستند در زمانی که غیر نسبیتی می‌شوند یعنی انرژی جنبشی متوسط آنها به انرژی جرم سکون افت می‌کند، به $۱۰^{۱۶} M_\odot$ می رسد که این معادل جرم ابر خوشه‌هاست، پس این جرم باید جرم اولین ساختارهایی باشد که به رمبش گرانشی در دوره نوترینو-غالب منجر می‌شود.

تصویر نوترینو-غالب ضعف‌های جدی دارد. یکی از مهمترین ضعف‌ها عدم توانایی توضیح تشکیل ساختارهای کهکشانی است. مطالعه ی غیر خطی خوشه ها بیانگر آن است که زمان تشکیل ابر خوشه‌ها، در دوره انتقال به سرخ با $z < ۲^{۳۸}$ می‌باشد از طرفی بهترین نتایج برای تشکیل کهکشان‌ها تقریباً در $z \approx ۳^{۴۰}$ است. در صورتی که روش توضیح ساختارها در مدل ماده تاریک داغ اصطلاحاً "top-down" است یعنی درابتدا

---

[۱۱] با توجه به هم ارزی جرم و انرژی، جرم ذرات بنیادی را می توان برحسب الکترون ولت بیان کرد.

[۱۲] HDM(Hot Dark Matter)

[۱۳] Free Streaming

ابرخوشـه‌ها و سـپس کهکشـان‌ها تشـکیل شده‌اند. به علاوه اگر کیهان اولیه نوترینو-غالب می‌بود بایستی افت و خیزهای چگالی که سـرانجام منجربه تشـکیل کهکشـان و خوشـه‌های کهکشـانی می‌شوند از بین می‌رفتند پس مدل‌های تشکیل ساختار که نوترینو را به عنوان مولفه اصلی ماده تاریک در نظر می‌گیرند نمی‌توانند ساختارهای واقعی را در عالم تولید کنند. این موارد باعث می‌شوند که نظریه‌ی ماده تاریک داغ (نوترینوها) رد شوند.

مکانیزم دیگری به نام ماده تاریک گرم[۱۴] نیز مطرح شد. در این مکانیزم ذرات پیشنهادی زودتر از نوترینو از سیستم گرمایی در حال تعادل جدا می‌شوند. اولین ساختارهای کیهانی در چنین مکانیزمی با جرمی معادل $M_{\odot}$ $۱۰^{۱۱}$ تولید می‌شوند که در حدود جرم یک کهکشان نوعی است. مشکل ماده تاریک داغ برای مدل ماده تاریک گرم نیز وجود دارد چرا که اجرام کوچکتر از $M_{\odot}$ $۱۰^{۱۱}$ قابل تشکیل شدن نیستند و در این صورت کهکشان‌های کوتوله‌ای که جرمی معادل $M_{\odot}$ $۱۰^{۷}$ دارند می‌بایستی از تکه تکه شدن این اجرام تولید شوند حتی این جدا شدن نیز منجر به تفاوت زیادی در $\frac{m}{L}$ کهکشان‌های کوتوله نسبت به کهکشان‌های مثلاً مارپیچی می‌شوند. حال آن که این تفاوت‌ها در مشاهدات دیده نمی شود.

انتخاب بعدی ماده تاریک سرد[۱۵] است. ماده تاریک سرد شامل ذراتی است که در لحظه جدایی از فوتون ها (واجفتیدگی) غیر نسبیتی هستند. به عنوان مثال یک ذره فرضی با جرمی حدود $۱۰۰Gev$ در هنگامی که دما $۱۰ev$ است جدا می‌شود. چنین ذره ای با سرعتی خیلی کمتر از سرعت نور می‌تواند حرکت کند. این ذرات نوسانات چگالی را در مقیاس‌های کوچک از بین نمی‌برند وهمچنین حد پایینی روی جرم اجسامی که ابتدا می‌توانند رمبش گرانشی داشته باشند، ندارند. در چارچوب نظریه ابرتقارن کاندیداهایی برای ماده تاریک سرد پیشنهاد شده است. ابرتقارن، تقارن اضافی برای ذرات درنظر می‌گیرد که بوسیله آن تعداد ذرات بنیادی دو برابر بدست می‌آید بدین ترتیب که هر بوزون یک همدم فرمیونی دارد و بالعکس. این نظریه نوترالینو را به عنوان، ذره جرمدار با برهم کنش ضعیف[۱۶] پیشنهادی برای ماده تاریک سرد معرفی می‌کند. همچنین ذره دیگری به نام آکسیون(a non-WIMP) می‌تواند کاندید ماده تاریک سرد باشد، ولی تاکنون هیچ کدام در آزمایش‌ها کشف نشده‌اند.

[۱۴] WDM(Warm Dark Matter)

[۱۵] CDM(Cold Dark Matter)

[۱۶] WIMP(Weakly intracting massive particls)

۱-۷) موند[۱۷] جایگزینی برای ماده تاریک

عده‌ای براین باورند که به جای پذیرش ماده تاریک باید گرانش نیوتنی را تصحیح کنیم. اولین شخصی که دراین زمینه کار کرد میلگروم[۱۸] بود. شتاب ستاره‌هایی که در فواصل دورتری از مرکزکهکشان قرار دارند بسیار کم است$\left(\left(\frac{m}{s^2}\right) \sim 10^{-10}\right)$. راهی که میلگرام در سال ۱۹۸۳ پیشنهاد کرده است این است که فرض کنیم قانون دینامیک برای شتاب‌های کمتر از$\left(\frac{cm}{s^2}\right) \sim 10^{-8}$ ، به جای $F = ma$، به شکل $F = ma\mu(a, a_0)$ باشد، که در این جا $\mu(a, a_0)$ تابعی است با این خاصیت که:

$$\mu(a, a_0) = \begin{cases} 1 & a \gg a_0 \\ \frac{a}{a_0} & a \ll a_0 \end{cases}$$

و $a_0 \cong 10^{-8}\ \frac{cm}{s^2}$ است. البته شکل‌های دیگری برای این تابع نیز می‌تواند درنظر گرفته شود که این خاصیت را داشته باشد، ولی در اینجا ساده‌ترین حالت آن را بیان کردیم.

برای فواصل دور از مرکز کهکشان که شتاب بسیار ناچیز است، نیروی گرانش بین دو ذره با توجه به قانون موند بصورت زیر است:

$$F = \frac{ma^2}{a_0} = \frac{GmM_G}{R^2}$$

که از رابطه فوق می‌توان شتاب ذره آزمون را بدست آورد:

$$a^2 = \frac{GM_G}{R^2} a_0$$

با توجه به اینکه سرعت چرخشی از رابطه‌ی $a = \frac{V^2}{R}$ بدست می‌آید داریم:

$$V^2 = \sqrt{GM_G a_0}$$

که نشان می‌دهد در فواصل دور از مرکز کهکشانی سرعت چرخشی ثابت است، یعنی

$$\lim_{r\to\infty} v(r) = (GM_G a_0)^{\frac{1}{4}} \equiv v_\infty$$

پس می‌بینیم که این شکل جدید قانون حرکت پیش بینی می‌کند که منحنی سرعت ستاره‌های کهکشان از یک rای به بعد تخت است. همچنین از رابطه فوق نتیجه می‌شود که $M_G \propto v_\infty{}^4$ می‌باشد. بنابراین بافرض ثابت بودن نسبت جرم به تابندگی$\left(\frac{m}{L} \sim constant\right)$ برای کهکشان‌ها نتیجه می‌شود که $L \propto v_\infty{}^4$ می باشد یعنی تابندگی یک کهکشان با سرعت چرخشی تخت کهکشان رابطه مستقیمی دارد و هر چه کهکشان درخشان‌تر باشد سرعت چرخشی آن بیشتر است.

[۱۷] MOND(modified Newtonian dynamics)

[۱۸] Milgrom